

# АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ МОДУЛЬНЫЕ ИНДУКЦИОННЫЕ НАГРЕВАТЕЛИ

Демидович В.Б., Оленин В.А., Григорьев Е.А., Ситько П.А.  
СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия, vbdemidovich@mail.ru

**Аннотация** – Рассматривается автоматизированный нагревательный комплекс на базе многомодульной индукционной установки. На примере трехмодульного индукционного нагревателя приводятся преимущества использования таких установок по сравнению с применяемыми в настоящее время кузнечными индукционными нагревателями. Многомодульные индукционные установки дают возможность оптимизации режимов работы оборудования по различным критериям, таким как энергопотребление, форма температурного профиля загрузки, производительность, а так же позволяют эффективно отработать возможные возмущения типа изменения скорости, диаметра заготовки, начальной температуры и тем самым минимизировать количество брака при нагреве.

**Ключевые слова** – индукционный нагрев, модульная установка, термообработка, температурный профиль, многозонный нагрев

Наблюдающийся в последнее время прогресс в разработках источников питания внес серьезные изменения в архитектуру и построение кузнечных индукционных нагревателей. Этот процесс напрямую связан с появившейся возможностью сильно уменьшить габариты источников питания, с резко возросшей удельной емкостью электротермических конденсаторов, а также снижением габаритов и повышением эффективности теплообменников. Управление нагревателем стало цифровым, и появилась возможность реализации управления им по модели. Все это привело к тому, что в настоящее время у ведущих компаний, производящих индукционное оборудование, индукционный нагреватель представляет собой набор модулей, со своими встроенными преобразователями частоты, станциями охлаждения, конденсаторными батареями, индивидуальными контроллерами (рис.1).

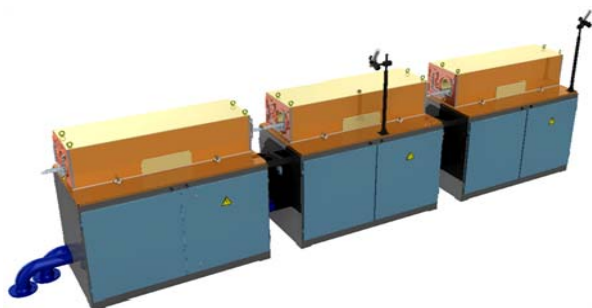


Рис.1 Общий вид модульной установки индукционного нагрева

В зависимости от количества индукционных модулей в составе установки существенно изменяется кривая нагрева заготовок по длине кузнечного индукционного нагревателя. Примеры такого изменения для нагрева заготовок диаметром 110 мм с производительностью 4 т/ч

показаны на рисунках 2,3,4.



Рис.2. Распределения температурного поля по длине индукционного нагревателя с использованием одного модуля



Рис.3. Распределения температурного поля по длине индукционного нагревателя с использованием двух модулей



Рис.4. Распределения температурного поля по длине индукционного нагревателя с использованием двух источников питания

Для использования разного количества модулей общая длина зоны нагрева остается неизменной и составляет ~ 4200мм. Конечная температура нагрева - 1200°. Длины индукторов в многомодульной системе нагрева равны, а мощность, подаваемая на каждый из них, может отличаться в 2-3 раза (рис. 5). Суммарная мощность всех источников питания в каждом случае отличается не более чем на 10%.

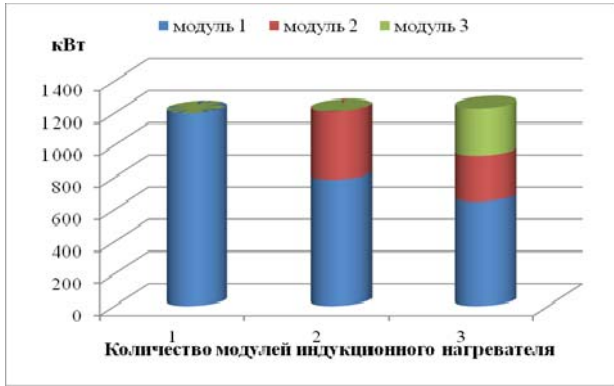


Рис.5. Распределение мощности источников питания по зонам нагрева в многомодульных индукционных нагревателях

Как видно из примера, по мере увеличения количества модулей нагрев заготовок приобретает «многозонный» характер. Такая структура позволяет создать систему адаптивного многозонного нагрева (АМН) заготовок, с несколькими индивидуально контролируемыми участками нагрева, питание которых происходит от автономных преобразователей частоты, по управлению объединенных в единую систему с контролем промежуточных параметров. Количество нагревательных модулей может варьироваться от одного до виртуально неограниченного числа, однако наиболее оптимально, с точки зрения вариативности управления распределением температурного поля по заготовкам, использовать три зоны нагрева и выше.

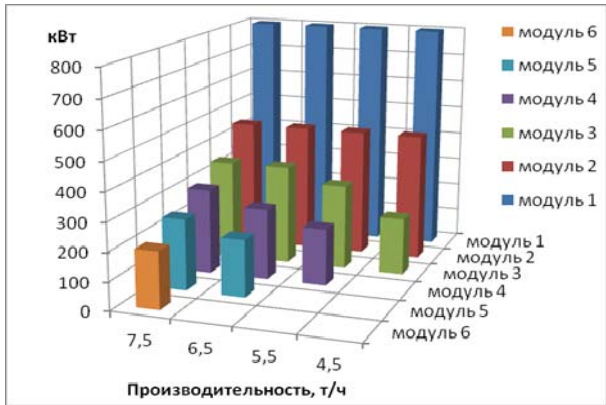


Рис.6. Зависимость количества нагревательных модулей от производительности установки индукционного нагрева

Количество и длина модулей зависит от производительности установки, требований к качеству нагрева и от параметров заготовок. На рисунке 6 представлена зависимость количества модулей от производительности установок при нагреве

цилиндрических заготовок диаметром 130мм перед ковкой.

Индивидуальное управление мощностью нагрева в каждом модуле позволяет гибко подстраивать термический режим под требования заказчика, минимизировать количество брака, а также снизить негативные влияния переходных режимов. Для примера на рисунке 7 изображены кривые нагрева цилиндрических заготовок диаметром 130 мм, полученные при различном распределении мощностей источников питания по модулям нагревателя с тремя зонами нагрева. Нижняя кривая, 3-й профиль (рис. 10), соответствует плавному режиму нагрева с конечной равномерностью распределения температуры по сечению заготовки 110 °С, средняя, 2-й профиль (рис. 9), и верхняя, 1-й профиль (рис. 8), кривые соответствуют ускоренному нагреву разной интенсивности с конечной равномерностью распределения температуры по сечению заготовки 50 °С. Плавный нагрев характеризуется пониженным окалинообразованием и высокой энергоэффективностью, ускоренный нагрев позволяет свести разность температур между поверхностью и центром заготовок до минимума. В зависимости от особенностей технологического процесса может быть выбран тот или иной вид кривой. Параметры нагрева заготовок при различных режимах нагрева приведены в таблице 1.

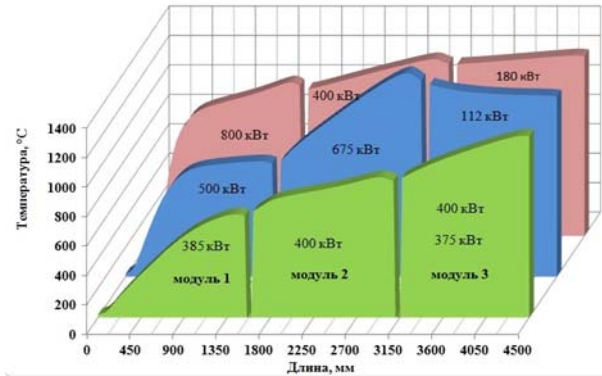


Рис. 7. Кривые регулирования температурного профиля всеми индукционными модулями в режиме управления мощностью (для заготовок диаметром 130мм, с производительностью 4,125 т/ч)

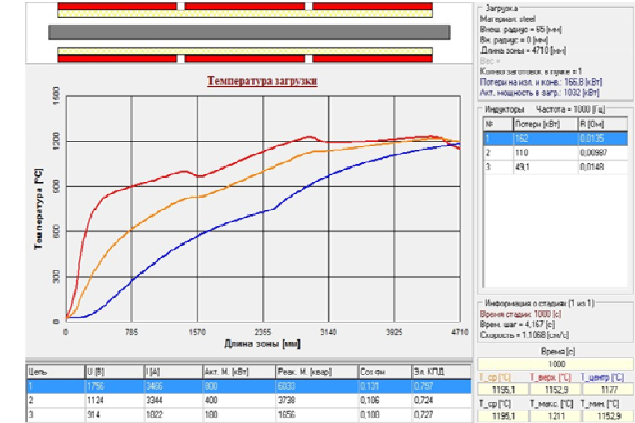


Рис. 8. Температурный профиль 1, соответствующий ускоренному режиму нагрева (для заготовок диаметром 130мм, с производительностью 4,125 т/ч)

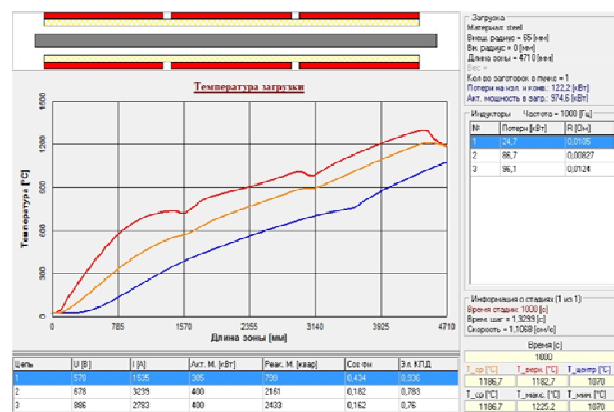
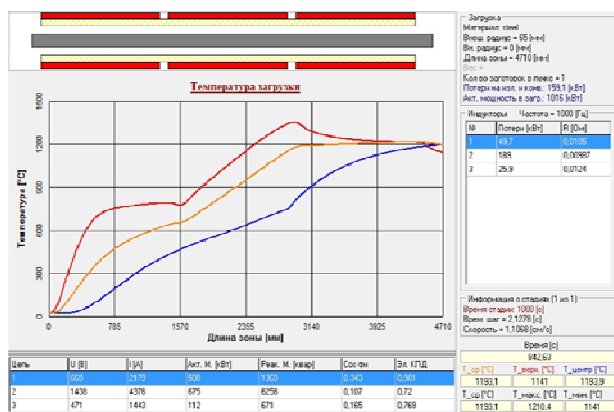


Таблица 1

Сравнение параметров нагрева заготовок при разных режимах нагрева (для заготовок диаметром 130 мм, с  
производительностью 4,125 т/ч)

Температурный профиль	КПД	Общая мощность, кВт	Температурный перепад по радиусу, °С	Энергоэффективность	Отсутствие окалинообразования	Отсутствие свариваемости торцов	Равномерность нагрева
1	67%	1380	50	+	++	++	+++
2	70%	1287	50	++	+	+	++
3	73%	1185	110	+++	+++	+++	+

Так же значительный эффект имеет применение метода многозонного нагрева во время переходных процессов, возникающих при работе установки. Это объясняется тем, что модульная структура позволяет применять различные алгоритмы задания мощности на каждом участке линии нагрева независимо друг от друга, что в сочетании с малой инерционностью индукционной системы позволяет эффективно отработать возникшие в процессе нагрева возмущения, тем самым минимизируя количество брака при нагреве.

Данный вывод подтверждается результатами численного моделирования процесса нагрева

цилиндрических заготовок с использованием нескольких преобразователей частоты. Они дают возможность создания оптимальной системы управления кузнечным индукционным нагревателем на базе трех и более модулей. В данном случае в установке из трех модулей управления нагревом заготовки происходит только на втором модуле по пирометру, точка визирования которого располагается внутри второго индуктора, при этом мощность на первом и третьем индукторе поддерживается на постоянном уровне. Из рисунка 11 видно, что

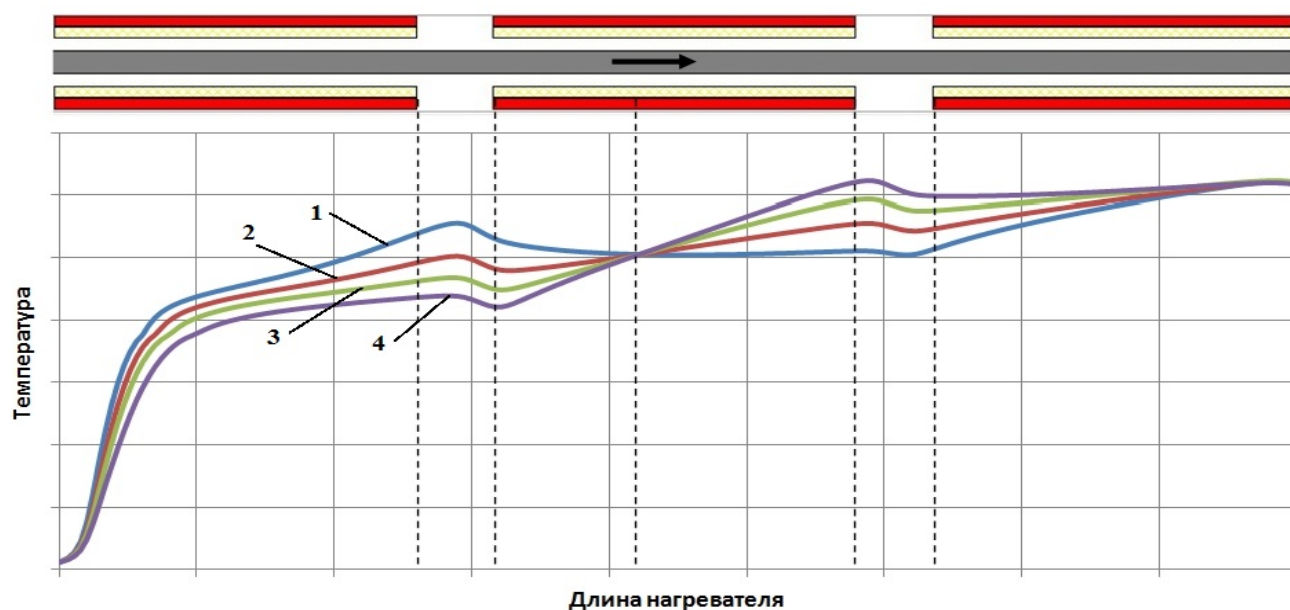


Рисунок 11 – Распределение температурного поля на поверхности заготовки по длине индукционного нагревателя с использованием трех источника питания для различных производительностей: 1–3.5 т/ч, 2–4.125 т/ч, 3–4.7 т/ч, 4–5.5 т/ч

температурные кривые при таком способе управления, полученные для различных производительностей, пересекаются в одной точке внутри второго индукционного модуля, а так же имеют одинаковую температуру на выходе из индукционного нагревателя. Вследствие чего можно утверждать, что при поддержании постоянной температуры в точке пересечения температурных кривых, путем создания системы автоматического регулирования с обратной связью по температуре, фиксируемой оптическим пирометром в точке контроля, то данный метод регулирования позволяет практически полностью убрать колебания температуры загрузки на выходе индукционной нагревательной установки во время переходного процесса.

Использование описанной модульной структуры имеет очевидные преимущества в технологии индукционного нагрева, так как делает возможным сохранить температурный профиль постоянным при производительностях, отличных от номинальной величины, позволяет эффективно отработать возможные возмущения типа изменения скорости, диаметра заготовки, начальной температуры и тем самым минимизируя количество брака при нагреве, дает возможность оптимизировать режимы работы оборудования относительно:

- энергопотребления
- окалинообразования
- снижения сваривания торцов заготовок
- изменения длины заготовок.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. M.Risch, A. Walther, A.Thus Innovative concept using IGBT multiconverter technology. HEAT PROCESSING, (4) issue 1, 2006, pp/43-45.
2. В.Б. Демидович, Б.М. Никитин, А.В. Титов Модульные индукционные установки нагрева прутков повышенной надежности. Индустрия, 2007, №1, с.19.
3. D. Brown Modular induction system offers billet-heating advantage. Forge, January 2008, pp. 13-16.
4. И.И. Баранкова, Е.А. Григорьев, П.А. Масликов, Г.В. Петров Моделирование тепловых переходных процессов в индукционных установках нагрева прутков. Материалы 2-ой международной конференции АРІН 09, 2009, с. 255-263.
5. Патент РФ №136665 – Модульный индукционный нагреватель цилиндрических заготовок непрерывного действия / Демидович В.Б., Ситько П.А. – Приоритет изобретения 16 июля 2013 г.